

УДК 621.17

doi:10.20998/2413-4295.2018.45.05

О ПРИМЕНЕНИИ ИМПУЛЬСНОГО ПОДВОДА ТЕПЛА В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Ф. И. ЛУХТУРА*, В. И. ЦЫГАНОВ

кафедра ПТЭУ и ТС, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь, УКРАИНА
*e-mail: lukhelenaa@yandex.ru

АННОТАЦИЯ Рассматриваются вопросы, связанные с влиянием импульсного нагрева теплоносителя на эффективность работы и параметры систем теплоснабжения. При реализации такого метода в системах отопления частных жилых помещений (домов) «водогрейный котел – теплообменники – жилые помещения», где рабочим телом (теплоносителем) является вода, необходимо, наряду с поддержанием комфортных условий внутри помещений, создать эффективный режим эксплуатации с минимизацией потребления топлива, что возможно может быть взаимоисключающими факторами влияния. Кроме того, в технической литературе теоретическое обоснование эффективности использования импульсного нагрева теплоносителя в системах отопления жилых зданий крайне ограничено, что послужило формулированию цели данной работы. Для ее достижения разработана математическая модель тепловой работы индивидуальной системы отопления здания с импульсным нагревом теплоносителя. На основе анализа уравнения динамики нагрева теплоносителя определены основные параметры импульсного отопления системы теплоснабжения, рациональные значения длительности подвода тепла и паузы между импульсами, а также скважности импульсов, в зависимости от величин поверхности нагрева отопительных приборов в зданиях, тепловых потерь в окружающую среду, емкости системы. Показано существенное влияние указанных функциональных параметров на характеристики импульсного подвода тепла и интенсивность нагрева теплоносителя. С ростом скважности импульсов или с уменьшением коэффициента заполнения цикла снижается величина подводимой мощности к системе теплоснабжения. Определены диапазоны изменения частоты импульсов, в пределах которых может быть более эффективен импульсный режим подвода тепла в системах теплоснабжения. Введено понятие, по аналогии с регулярным режимом нагрева (охлаждения), темпа нагрева (остывания) теплоносителя – скорости изменения его температуры. Полученные результаты разработки инженерной методики для расчета функциональных параметров импульсного подвода тепла к системам теплоснабжения позволяют осуществлять выбор более эффективных параметрических и конструктивных их характеристик при проектировании систем теплоснабжения и способов эксплуатации, в т.ч. теплогенераторов на соответствующую тепловую мощность.

Ключевые слова: источник тепла; теплоноситель; система теплоснабжения; импульс; коэффициент заполнения цикла

ON THE USE OF PULSE HEAT IN A HEAT SUPPLY SYSTEM

F. LUKHTURA*, V. TSIGANOV

Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, SHEE "PSTU", Mariupol, UKRAINE

ABSTRACT Issues related to the effect of pulsed heating of the coolant on the operating efficiency and parameters of heat supply systems are considered. When implementing this method in heating systems of private residential premises (houses), a "hot water boiler — heat exchangers — residential premises", where water is the working medium (coolant), it is necessary, along with maintaining comfortable indoor conditions, to create an effective mode of operation while minimizing fuel consumption that may possibly be mutually exclusive influencing factors. In addition, in the technical literature, the theoretical justification for the effectiveness of the use of pulsed heating of the coolant in heating systems of residential buildings is extremely limited, which served to formulate the purpose of this work. To achieve this, a mathematical model of the thermal operation of an individual heating system of a building with pulse heating of the heat carrier has been developed. Based on the analysis of the dynamic equation for heating the heat carrier, the main parameters of the pulsed heating of the heat supply system, rational values of the duration of heat supply and pause between pulses, as well as the pulse ratio of pulses, depending on the values of the heating surface of heating devices in buildings, heat losses to the environment, and system capacity are determined. The significant effect of these functional parameters on the characteristics of the pulsed heat supply and the heating intensity of the coolant is shown. With an increase in the pulse duty cycle or with a decrease in the cycle fill factor, the amount of input power to the heating system decreases. The ranges of change in the frequency of the pulses, within which the pulsed mode of heat supply in heat supply systems can be more effective, have been determined. Introduced the concept, by analogy with the regular mode of heating (cooling), the rate of heating (cooling) of the coolant - the rate of change of its temperature. The results of the development of engineering methods for calculating the functional parameters of the pulsed heat supply to heat supply systems allows for the selection of more efficient parametric and structural characteristics of them when designing heat supply systems and operation methods, including heat generators on the corresponding thermal power.

Keywords: heat source; heat carrier; heat supply system; impulse; duty cycle

Введение

В настоящее время теплоэнергетика вступают в новый этап своего развития, связанный с повышением тепловой эффективности теплоснабжения жилых и

общественных зданий. Повышение тепловой эффективности происходит с учетом предыдущих достижений по энергосбережению, с использованием новейших инновационных энергосберегающих

решений в системах теплоснабжения зданий. Снижение затрат энергии на обеспечение микроклимата в зданиях и сооружениях является весьма актуальной проблемой. Её решение может быть выполнено лишь на основе всестороннего анализа теплового процесса, реализуемого в здании, под которым понимается последовательная цепь взаимообусловленных энергетических превращений, связанных с переносом теплоты от источника в окружающую среду. Возможности дальнейшего совершенствования работы теплоэнергетических установок (в первую очередь, источников тепла – водогрейных котлов), базирующихся на хорошо изученном стационарном процессе горения, ограничены. Поэтому необходимо осваивать новые энергосберегающие технологии. В этом направлении весьма перспективным представляется реализация в теплоэнергетических установках процессов пульсирующего подвода тепла и (или) пульсирующего горения. Не случайно во многих странах ведутся интенсивные исследования в области проектирования и внедрения в технологические процессы теплоэнергетических установок на основе систем пульсирующего горения или пульсирующего подвода тепла. Широкое внедрение таких систем в технологические процессы сдерживается отсутствием надежной теории их рабочего процесса для расчета конструктивных и режимных параметров при их проектировании.

Работы по теоретическому обоснованию и технической реализации технологии импульсного горения (отопления) начаты практически в начале прошлого века и продолжились в 60-70-е годы прошлого столетия. В эти же годы начали активно и широко разрабатываться системы импульсного горения, импульсного нагрева заготовок, отопления [1–10] и которые, в основном, применялись в энергетических котлах и в нагревательных печах камерного типа, в первую очередь, нагревательных колодках для нагрева слитков металла [11–14]. Позже импульсное отопление получило своё развитие в термических печах [11–14]; также были рассмотрены режимы импульсно-скоростного нагрева [15,16]. В то же время тепловая работа методических печей с импульсным отоплением и нагрев в них металла освещены мало [16]; некоторые специфические особенности, по мнению [16], не раскрыты и требуют дальнейшего изучения.

Суть импульсного отопления заключается в том, что при управлении тепловой мощностью печи расход газа изменяется дискретно и может принимать только два предельных значения: максимальное, соответствующее наиболее благоприятному распределению газов в рабочей камере и минимально-допустимое по условию работы горелочных устройств и обеспечению рабочего давления в печи. Подвод тепла регулируется модуляцией частоты цикла. Цикличность подвода тепла осуществляется следующим образом: в течение контролируемого

промежутка времени горелки работают в режиме «большого» горения, а затем переключаются в режим «малого» горения или полностью выключаются. Этот цикл повторяется довольно часто и промежуток времени включения и отключения управляется. Поэтому импульсное горение может быть названо частотно-модулированным горением. При реализации предлагаемого метода нагрев очередной порции теплоносителя осуществляется в условиях наибольшей разности температур, что позволяет заметно интенсифицировать процесс теплообмена за счет увеличения конвективной составляющей и радиационной (излучательной) поверхности факела горения.

При изменении температуры в печи изменяется длительность импульсов подачи топлива [11–16], таким образом, осуществляется широтно-импульсная модуляция газо-воздушного потока. Средняя по времени тепловая нагрузка определяется соотношением длительности импульса и паузы – скважностью, что устанавливает регулятор температуры в печи.

Импульсный подвод тепла, наряду с вышеприведенным применением, может использоваться также и при теплоснабжении зданий и в системах отопления с тепловыми насосными установками [17]. Целесообразность такого направления работы в системах теплоснабжения зданий [17–22], обусловлена тем, что импульсный режим отопления промышленных печей, как это установлено [11–16], характеризуется заметной экономией тепловой энергии. Поэтому вполне оправданным является и ожидание того, что применение такого режима для отопления зданий будет также энергетически выгодным. При реализации такого метода в системах отопления частных жилых помещений (домов) «водогрейный котел – теплообменники – жилые помещения», где рабочим телом (теплоносителем) является обычно вода, необходимо, наряду с поддержанием комфортных условий внутри помещений, создать эффективный режим эксплуатации с минимизацией потребления топлива, что возможно может быть взаимно исключаящими факторами влияния. К тому же при использовании импульсного нагрева теплоносителя в системах отопления жилых зданий теоретическое обоснование его эффективности и глубокий анализ динамики импульсного отопления в технической литературе, кроме [17] и попытки в [20–22], практически отсутствуют.

Цель работы

Разработка физической модели рабочего процесса с импульсным подводом тепла к системе теплоснабжения зданий и его анализ, обоснование эффективности и преимущество использования импульсного подвода тепла к системе отопления для повышения эффективности теплоснабжения.

Изложение основного материала

Пусть имеем систему теплоснабжения (отопления) объемом V с источником тепловой энергии (котлом), с массой теплоносителя m , и площадью поверхности теплообмена $F_{нагр}$. (Систему отопления конкретного здания объемом помещений W или поверхностью ограждений F можно условно заменить эквивалентным отопительным прибором). Примем, что температура окружающей среды и коэффициенты теплопередачи постоянны. Обозначим среднюю температуру теплоносителя ϑ , среднюю температуру воздуха в помещении θ . Справедливость предположения о преимуществе использования импульсного нагрева теплоносителя в системах отопления можно доказать лишь на основе анализа уравнения динамики импульсного нагрева теплоносителя (1) и его остывания (2) [23] (в отсутствии его нагрева при отключении подачи тепла или, например, топлива в горелочное устройство котла):

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3; \quad (1)$$

$$dQ_2 = -dQ_3; \quad (2)$$

$$dQ_1 = P dt; \quad dQ_2 = m c d\vartheta; \\ dQ_3 = kF(\theta - \vartheta_0) dt = kF(\kappa \vartheta - \kappa \vartheta_0) dt,$$

где dQ_1 – подводимая теплота; dQ_2 – теплота, затраченная на изменение температуры теплоносителя; dQ_3 – потери теплоты в помещение (и окружающую среду); P – подводимая тепловая мощность; dt – интервал времени; m – масса нагреваемого теплоносителя; c – теплоемкость теплоносителя; ϑ – текущая температура теплоносителя; k – коэффициент теплопередачи; F – поверхность теплопередачи (поверхность ограждения); θ – температура воздуха в помещении, для простоты принята пропорциональной температуре теплоносителя; ϑ_0 – температура окружающей среды (в помещении или за ее пределами); κ – коэффициент пропорциональности температуры воздуха внутри помещения температуре теплоносителя. Коэффициент κ зависит от параметров теплообмена между теплоносителем и окружающей средой. С достаточной точностью этот коэффициент можно определить из равенства тепловых потоков от теплоносителя в жилое помещение и от атмосферы внутреннего помещения в окружающую среду при квазистационарном режиме теплообмена

$$kF(\theta - \vartheta_0) dt = k_n F_n (\vartheta - \theta) dt = k_n F_n \kappa (\vartheta - \vartheta_0) dt \quad \text{или}$$

$$\theta = \frac{\vartheta}{1 + \kappa_0} + \frac{\kappa_0}{1 + \kappa_0} \vartheta_0, \quad \kappa_0 = \frac{kF}{k_n F_n},$$

$$\kappa = \frac{1}{1 + \kappa_0} = \frac{1}{1 + \frac{kF}{k_n F_n}} < 1.$$

где k_n – коэффициент теплопередачи от отопительных приборов в обогреваемое помещение; F_n – поверхность нагрева отопительных приборов. Соотношения (1) и (2), с учетом обозначений в первом соотношении величины $\frac{P}{\kappa \cdot kF} + \vartheta_0$ символом $\vartheta_{уст}$, во втором – ϑ_0 символом $\vartheta_{уст}$, сводятся к общему виду

$$\frac{T}{\kappa} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta - \vartheta_{уст} = 0. \quad (3)$$

или

$$\frac{d(\vartheta - \vartheta_{уст})}{(\vartheta - \vartheta_{уст})} = -\frac{\kappa}{T} \cdot dt, \quad \text{или} \quad -\frac{1}{\vartheta'} \frac{d\vartheta'}{dt} = M, \quad (4)$$

$$\vartheta' = \vartheta - \vartheta_{уст}, \quad M = \frac{\kappa}{T}.$$

Здесь $\frac{mc}{kF} = T$ – некоторая временная

постоянная. Символ $\vartheta_{уст}$ обозначает установившееся значение температуры теплоносителя, достигаемое при прекращении изменения, т.е. при выполнении условия $\frac{d\vartheta}{dt} = 0$

выхода на стационарный режим.

Запись уравнений (3) в виде (4) аналогична соотношению Г. М. Кондратьева для регулярного режима охлаждения (нагрева) тела [24,25], а величину M скорости изменения ϑ' по аналогии с теорией регулярного режима можно назвать темпом охлаждения (или нагрева). Значение M зависит от физических свойств теплоносителя, его размеров, условий теплообмена (поверхности теплообмена и коэффициента теплопередачи от обогревателей в помещение или через ограждение здания).

Выражения (3) и (4) представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка, решением которого является

$$\vartheta = \vartheta_{уст} - (\vartheta_{уст} - \vartheta_{нач}) \cdot e^{-t\kappa/T}, \quad (5)$$

где $\vartheta_{нач}$ – начальная температура теплоносителя (температура в начале процесса нагрева или остывания при $t = 0$). Графическое изображение этого решения представлено на рис. 1. Граничные значения температуры теплоносителя могут быть записаны в виде условий: $\vartheta = \vartheta_{нач}$ при $t = 0$ и $\vartheta = \vartheta_{уст}$ при $t \rightarrow \infty$.

Таким образом, графически нагрев и остывание (охлаждение) теплоносителя в импульсном режиме проиллюстрированы на рис. 1 (соответственно а) и б)). Подводимая мощность в котле, нагрев теплоносителя за время $\tau_{имп}$ и остывание теплоносителя во время паузы $\tau_{паузы}$ в импульсном режиме проиллюстрированы на рис. 2.

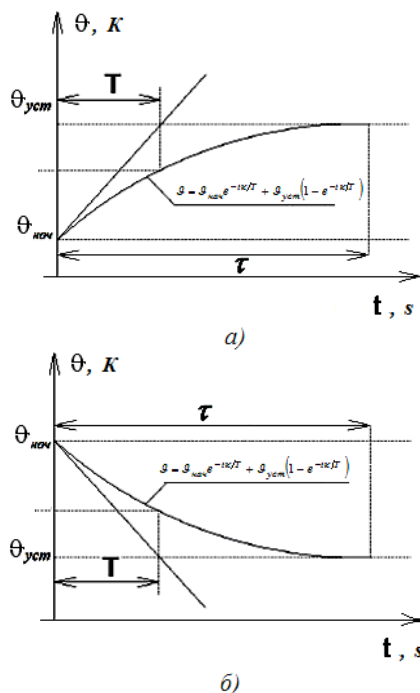


Рис. 1 - Графическое представление зависимости температуры теплоносителя от времени а) нагрева и б) остывания

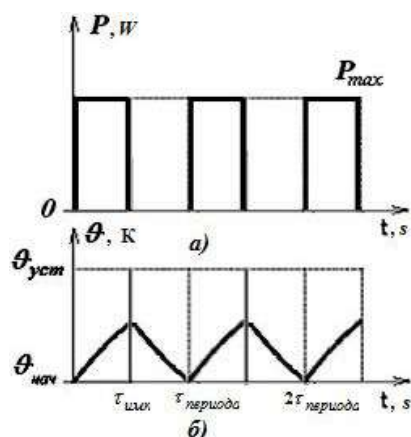


Рис. 2 - Динамика подвода тепловой мощности к теплоносителю (а), нагрева и остывания теплоносителя (б) в импульсном режиме

При этом длительность нагрева (импульс нагрева) – отрезок времени, в течение которого осуществляется подвод тепла при максимальном значении. Этот отрезок времени можно определить, используя соотношение (5):

$$\tau_{имп} = \frac{mc}{kF} \cdot \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \frac{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0 \right) - \vartheta_{нач}}{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0 \right) - \vartheta} \quad (6)$$

Длительность остывания теплоносителя (пауза) в системе теплоснабжения – отрезок времени между двумя последовательными импульсами, в течение которого подвод тепла отсутствует, и происходит охлаждение теплоносителя вследствие потерь тепла в окружающую среду

$$\tau_{паузы} = \frac{mc}{kF} \cdot \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \frac{\vartheta_{нач} - \vartheta_0}{\vartheta - \vartheta_0} \quad (7)$$

Тогда период процесса $\tau_{пер}$ – отрезок времени между началами двух последовательных импульсов, определяется суммой соотношений (6) и (7), а их скважность S равна отношению периода $\tau_{пер}$ следования импульсов к длительности импульса $\tau_{имп}$

$$S = \frac{\tau_{пер}}{\tau_{имп}} = 1 + \frac{\ln \frac{\vartheta_{нач.паузы} - \vartheta_0}{\vartheta_{кон.паузы} - \vartheta_0}}{\ln \frac{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0 \right) - \vartheta_{нач.имп}}{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0 \right) - \vartheta_{кон.имп}}} \quad (8)$$

При этом, температура в конце импульса подвода тепла равна температуре в начале паузы $\vartheta_{кон.имп} = \vartheta_{нач.паузы}$, в конце паузы $\vartheta_{кон.паузы} = \vartheta_{нач.имп}$ (рис. 2).

В общем случае сложных форм импульсов скважность определяется отношением площади осциллограммы, ограниченной по горизонтали длительностью периода $\tau_{имп}$, а по вертикали – амплитудой импульсов теплоподвода, к площади, занимаемой этими импульсами в указанных границах.

Тогда осредненная величина подведенной тепловой мощности P_{cp} , определится по формуле:

$$P_{cp} = P_{max}/S = P_{max} \cdot \beta \quad (9)$$

Коэффициент заполнения цикла или коэффициент использования мощности источника тепла β – обратная величина скважности импульсов:

$$\beta = \frac{1}{S} = \frac{\tau_{имп}}{\tau_{пер}} = \frac{B}{B^{уст}} \quad (10)$$

где $\tau_{пер}$ – период включения источника тепла, с; $\tau_{имп}$ – продолжительность одного импульса, с; B – осредненный по времени расход условного топлива при импульсном нагреве теплоносителя, м³/с; $B^{уст}$ – установленный (максимальный) расход топлива, м³/сек; а продолжительность одного импульса

$$\tau_{имп} = \beta \cdot \tau_{пер} \quad (11)$$

Обсуждение результатов

Произведем сравнение количества тепловой энергии, переданной окружающей среде по традиционному непрерывному нагреву при неизменной температуре теплоносителя за время от 0 до $\tau_{пер}$ (при равенстве слагаемого в уравнении сохранения (1) $dQ_2 = 0$), и количество теплоты

$Q_3^{имп} + Q_3^{наузы}$, переданное по рекомендуемому способу импульсного нагрева от начальной температуры $\vartheta_{нач}$ до температуры, которую примет теплоноситель в результате нагрева и остывания за время 0 до $\tau_{имп}$ и от 0 до $\tau_{наузы}$, т.е. за все время $\tau_{пер}$. Обозначим первое количество теплоты символом $Q_3^{(2)}$, второе – символом $Q_3^{(1)}$. Для справедливости неравенства $Q_3^{(2)} > Q_3^{(1)}$ необходимо, чтобы $Q_3^{(2)} - Q_3^{(1)} > 0$. В результате будем иметь:

$$Q_3^{(1)} = kF \cdot \kappa \left[\left(\vartheta_{нач}^{имп} - \vartheta_{уст}^{имп} \right) \left(-\frac{T}{\kappa} \right) \left(e^{-\frac{\tau_{имп}\kappa}{T}} - 1 \right) + \left(\vartheta_{уст}^{имп} - \vartheta_0 \right) \tau_{имп} \right] +$$

$$+ kF \cdot \kappa \left[\left(\vartheta_{нач}^{наузы} - \vartheta_{уст}^{наузы} \right) \left(-\frac{T}{\kappa} \right) \left(e^{-\frac{\tau_{наузы}\kappa}{T}} - 1 \right) + \left(\vartheta_{уст}^{наузы} - \vartheta_0 \right) \tau_{наузы} \right]. \quad (12)$$

$$Q_3^{(2)} = \int_0^{\tau_{пер}} dQ_3 = \int_0^{\tau_{пер}} kF(\vartheta - \vartheta_0) dt =$$

$$= kF \cdot \kappa (\vartheta - \vartheta_0) \int_0^{\tau_{пер}} dt = kF \cdot \kappa (\vartheta - \vartheta_0) \tau_{пер} \quad (13)$$

или

$$Q_3^{(2)} = kF(\vartheta - \vartheta_0) \tau_{пер},$$

при этом температура теплоносителя

$$\vartheta = \vartheta^{стац} = \vartheta_0 + \frac{Q_{ном}^{окр.ср}}{kF\kappa} = \vartheta_0 + \frac{B^{стац} Q_p^p \eta_{\kappa}}{kF\kappa}.$$

где $Q_{ном}^{окр.ср}$ - потери тепла в окружающую среду на стационарном режиме эксплуатации системы теплоснабжения; Q_p^p - располагаемое тепло в источнике тепла (котле); η_{κ} - КПД источника тепла. Средний расход топлива в горелке котла $B^{стац}$ на стационарном режиме рассчитывается из теплового баланса источника тепла (котла) по (1) при $dQ_2 = 0$, т.е. при $dQ_1 = dQ_3$. Для сравнения значений $Q_3^{(1)}$ и $Q_3^{(2)}$, полученных по выражениям (15) и (16), соответственно найдем их разность:

$$\Delta Q_3 = Q_3^{(2)} - Q_3^{(1)} =$$

$$= kF \cdot \kappa \cdot \tau_{пер} \left\{ \left[\vartheta + \left(\vartheta_{нач}^{имп} - \vartheta_{уст}^{имп} \right) \left(-\frac{T}{\kappa \tau_{пер}} \right) \left(e^{-\frac{\tau_{имп}\kappa}{T}} - 1 \right) - \frac{\vartheta_{уст}^{имп}}{S} \right] + \right.$$

$$\left. + \left[\left(\vartheta_{нач}^{наузы} - \vartheta_{уст}^{наузы} \right) \left(-\frac{T}{\kappa \tau_{пер}} \right) \left(e^{-\frac{\tau_{наузы}\kappa}{T}} - 1 \right) - \frac{(S-1)\vartheta_{уст}^{наузы}}{S} \right] \right\} > 0 \quad (14)$$

При этом $\vartheta_{уст}^{имп} = \frac{P}{\kappa \cdot kF} + \vartheta_0$, $\vartheta_{уст}^{наузы} = \vartheta_0$,

$$\vartheta_{нач}^{наузы} = \vartheta_{кон}^{имп},$$

$$e^{-\frac{\tau_{имп}\kappa}{T}} = \left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0 \right) - \vartheta, \quad e^{-\frac{\tau_{наузы}\kappa}{T}} = \frac{\vartheta - \vartheta_0}{\vartheta_{нач} - \vartheta_0}.$$

Сомножители $kF \cdot \kappa \cdot \tau_{пер} > 0$ и

$\vartheta_{нач} - \vartheta_{уст} > 0$. Для справедливости неравенства

$Q_3^{(2)} > Q_3^{(1)}$ необходимо, чтобы $Q_3^{(2)} - Q_3^{(1)} > 0$, что будет соблюдаться при условии

$$\vartheta + \left[\left(\vartheta_{нач}^{имп} - \frac{P}{\kappa \cdot kF} - \vartheta_0 \right) \left(-\frac{T}{\kappa \tau_{пер}} \right) \left(\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0 \right) - \vartheta \right) - 1 \right] -$$

$$\left[-\frac{P}{\kappa \cdot kF} + \vartheta_0 \right] +$$

$$+ \left[\left(\vartheta_{нач}^{наузы} - \vartheta_0 \right) \left(-\frac{T}{\kappa \tau_{пер}} \right) \left(\frac{\vartheta - \vartheta_0}{\vartheta_{нач} - \vartheta_0} - 1 \right) - \frac{(S-1)\vartheta_0}{S} \right] > 0.$$

Тогда, преобразуя последнее выражение с учетом выше приведенных соотношений, и для простоты принимая равенство $\vartheta = \vartheta_{нач}^{наузы}$, что несколько завышает показатели эффективности применения импульсного режима подвода тепла к теплоносителю, получим

$$\vartheta_{нач}^{наузы} + \frac{P}{\kappa \cdot kF} \left(-\frac{T}{\kappa \tau_{пер}} \right) \left[1 - \frac{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0 \right) - \vartheta_{нач}^{наузы}}{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0 \right) - \vartheta_{нач}^{имп}} \right] +$$

$$+ \frac{(1-S)\vartheta_0}{S} - \frac{P}{\kappa \cdot kF} + \vartheta_0 - \left(\vartheta_{нач}^{наузы} - \vartheta_0 \right) \left(-\frac{T}{\kappa \tau_{пер}} \right) > 0.$$

т.е. необходимым и обязательным условием для выполнения неравенства $Q_3^{(2)} - Q_3^{(1)} > 0$ является

$$\tau_{пер} > A + B \tau_{имп}; \quad (15)$$

$$A = \frac{mc \left[\left(\vartheta_{нач}^{наузы} - \vartheta_0 \right) - \frac{\vartheta_{нач}^{наузы} - \vartheta_{нач}^{имп}}{1 + \frac{\vartheta_0}{P/(\kappa \cdot kF)}} \right]}{\kappa \cdot kF (\vartheta_{нач}^{наузы} - \vartheta_0)};$$

$$B = \frac{P}{\kappa \cdot kF (\vartheta_{нач}^{наузы} - \vartheta_0)},$$

а скважность импульсов в соответствии с (8) должна соответствовать условию $S > \frac{A}{\tau_{имп}} + B$. При этом практически всегда выполняется неравенство

$$(g_{нач}^{паузы} - g_0) > \frac{g_{нач}^{паузы} - g_{нач}^{имп}}{1 + \frac{g_0}{P/(\kappa \cdot kF)}}.$$

Отсюда продолжительность импульса подвода тепла к системе отопления (теплоснабжения) здания, при принятых допущениях, должна соответствовать условию

$$\tau_{имп} < \frac{\tau_{пер} - A}{B}, \quad (16)$$

а частота цикла (процесса)

$$\omega = \tau_{пер}^{-1} < \frac{\kappa \cdot kF (g_{нач}^{паузы} - g_0)}{mc \left[(g_{нач}^{паузы} - g_0) - \frac{g_{нач}^{паузы} - g_{нач}^{имп}}{1 + \frac{g_0}{P/(\kappa \cdot kF)}} \right] + P \cdot \tau_{имп}} =$$

$$= \kappa \frac{kF}{mc} \left[\ell n \left(\frac{\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + g_0}{\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + g_0} \right) - g_{нач}^{имп} + \ell n \frac{g_{нач}^{паузы} - g_0}{g_{нач}^{паузы} - g_0} \right]. \quad (17)$$

Последнее соотношение для определения величины частоты подвода тепла (импульсов), c^{-1} , получено с учетом величины *периода включения* $\tau_{пер}$ – отрезка времени между началами двух последовательных импульсов. При соблюдении условий (16) и (17) импульсный режим подвода тепла к теплоносителю (системе отопления и т.п.), как независимый самостоятельный фактор влияния, является более экономичным, чем безимпульсный режим.

В предельном случае при гипотетическом равенстве $\frac{P}{\kappa \cdot kF} = 0$, последнее выражение примет вид

$$(g_{нач}^{паузы} - g_0) - (g_{нач}^{паузы} - g_0) \left(\frac{T}{\kappa \tau_{пер}} \right) > 0 \text{ или}$$

$$(g_{нач}^{паузы} - g_0) \left(1 - \frac{T}{\kappa \tau_{пер}} \right) > 0.$$

откуда $\tau_{пер} > \frac{T}{\kappa}$, а частота $\omega < \frac{\kappa}{T}$, т.е. при любом

действительном значении $\tau_{пер} > \frac{mc}{\kappa \cdot kF}$ и с учетом того, что τ (время) всегда положительно, можно сделать вывод о выполнении неравенства $Q_3^{(2)} > Q_3^{(1)}$ при соблюдении условия (16) или (17).

Полученные результаты позволяют утверждать, что подвод тепла в импульсном режиме с энергетической точки зрения может быть более эффективен при представленных выше условиях. Объем тепловой энергии, снятый с теплообменника

при импульсных подключениях источника тепла или, например, горелочных устройств, оказывается большим, чем при использовании безимпульсного подогрева в течение того же времени, и при той же средней температуре воздуха в помещении, что приводит, согласно (9) и (10), к сокращению расхода топлива в источнике тепла (котле). Кроме того, увеличение мощности теплоподвода, т.е. роста $\kappa g_{уст}$ приводит еще к более эффективному режиму импульсного подвода тепла. Последнее обстоятельство может несколько снижать уровень комфортности в жилых помещениях при росте температуры теплоносителя.

Из (17) следует, что на частоту импульсов влияет температура окружающей среды, поверхность нагрева теплообменников внутри помещений (батареи), расположенных в помещении, количество теплоносителя в отопительной системе, поверхность ограждающих стен, а также мощность подвода тепла и начальная и конечная температуры подогрева теплоносителя (амплитудная характеристика системы). Причем снижение температуры окружающей среды приводит к увеличению длительности импульсов, а значит к увеличению скважности.

Последняя статья воздействия, зависящая от задатчика температуры, влияет также на частоту подвода тепла при всех остальных неизменных параметрах системы отопления и теплопередачи. Кроме того, увеличение частоты импульсов ω при снижении температуры «потолка нагрева» снижает эффективность теплоподвода, т.к. при этом снижение амплитуды изменения температуры (сглаживание) приводит к перерасходу топлива в связи с поддержанием необходимой температуры внутри обогреваемого помещения.

Следует особо отметить, что для поддержания более эффективной работы системы отопления на область изменения частоты импульсов накладывается ограничение (16), (17). При некоторых условиях (значениях температуры окружающей среды) выгода от применения импульсного подвода тепла в системах теплоснабжения может свестись только к более эффективным условиям теплообмена в источнике тепла.

Таким образом, определены длительности подвода тепла и паузы между импульсами, а также скважность импульсов, в зависимости от поверхности нагрева отопительных приборов в зданиях и тепловых потерь в окружающую среду, оценены амплитудно-частотные характеристики импульсного режима подвода тепла в системе отопления.

Предлагаемый метод нагрева теплоносителя должен, по-возможности, осуществляться в условиях наибольшей по-возможности разности температур, что позволяет заметно интенсифицировать процесс теплообмена в источнике тепла за счет роста значения коэффициентов теплоотдачи конвекцией и излучением в этих условиях.

Выводы

1. С использованием представленной аналитической модели системы импульсного теплоснабжения определены основные параметры режима импульсного нагрева теплоносителя.
2. Для повышения эффективности работы системы отопления с импульсным нагревом теплоносителя необходимо выдерживать определенное соотношение между длительностью импульса нагрева и периодом процесса.
3. Полученные результаты разработки инженерной методики для расчета функциональных параметров импульсного подвода тепла к системам теплоснабжения позволяет осуществлять выбор более эффективных параметрических и конструктивных их характеристик при проектировании систем теплоснабжения и способов эксплуатации, в т.ч. теплогенераторов на соответствующую тепловую мощность.
4. При дальнейших исследованиях в рассматриваемом направлении целесообразным является учет тепло- и массообмена в источнике тепла (котельного агрегата) при различных интенсивностях импульсного теплоподвода, влияния скорости циркуляции теплоносителя в системе отопления, что позволит получить более полную картину передачи тепла и разработать более эффективные методики импульсного подвода тепла в системах отопления зданий.

Список литературы

1. Al-Qahtani, H. Temperature and stress fields for short pulse heating of solids / H. Al-Qahtani, B. S. Yilbas // *J. Thermophysics and Heat Transfer*. – 2011. – Vol. 25, № 1. – P. 173-176. – doi: 10.2514/1.49949.
2. Раушенбах, Б. В. Вибрационное горение / Б. В. Раушенбах. – М.: Гос. Изд-во физ.-мат. лит., 1961.-498с.
3. Теория топочных процессов / Г. Ф. Кнорре [и др.]. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 491 с.
4. Кацнельсон, Б. Д. Сжигание топлива в пульсирующем потоке / Б. Д. Кацнельсон, А. А. Таракановский // Теория и практика пульсационного горения: Тр. ЦКТИ. – Л., 1965. – Вып. 64. – С. 3-7.
5. Wallace, D. C. Specific heat of high purity iron by a pulse heating method / D. C. Wallace, P. H. Sidles, G. C. Danielson // *J. of Applied Physics*. – 1960. – Vol. 31, Issue 1. – P. 168-176. – doi:10.1063/1.1735393.
6. Hong, Y. Experimental Study of Bubble Dynamics on a Micro Heater Induced by Pulse Heating / Y. Hong, N. Ashgriz, J. Andrews // *J. Heat Transfer*. – 2004. – Vol. 126, № 2. – P. 259-271. – doi:10.1115/1.1650388.
7. Wire, M. S. High-temperature specific heat by a pulse-heating method / M. S. Wire, Z. Fisk, G. W. Webb // *Rev. Sci. Instrum.*, 1985. – Vol. 56, No. 6. – P. 1223-1228. doi:10.1063/1.1137980.
8. Mingcheng, Zong. Pulse-heating infrared thermography nondestructive testing technique / Mingcheng, Zong, Jianxin Zhang, Yan Zhao // *Proc. SPIE 2899*, Automated Optical Inspection for Industry. – 1996. – doi: 10.1117/12.253033;
9. Hu, L. An Improved Methodology for Pulse Combustion with Programmable Timing Sequence Used in Reheating Furnaces / Lingyan Hu, Yana Lv, Kai Tang, Gwynfor Richards // *ISIJ International*. – 2017. – Vol. 57, № 12. – P. 2266-2268. – doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-020.
10. Druzhinin, G. M. Solution to Problem of Heating of Metal in the Furnace Taking into Account Pulse Nature of Heating / G. M. Druzhinin, Yu. A. Samoylovich, Ev. V. Popov // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 609-614. – doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.698.609.
11. Исследование теплового режима нагревательного колодца с одной верхней горелкой при импульсном отоплении / М. А. Глишков, В. Ю. Каганов, Ш. Энекеш, Б. Габор, Т. Сарка // *Сталь*. – 1973. – № 2. – С. 171-173.
12. Работа нагревательных колодцев с верхней горелкой при пульсирующем факеле / Е. А. Капустин, Ю. Н. Шаламов, А. М. Кулаков, П.Т. Кривенко, А. И. Киселев // *Сталь*. – 1980. – № 2. – С. 1105-1107.
13. Ревун, М. П. Интенсификация работы нагревательных печей // М. П. Ревун, В. И. Гранковский, А. Н. Байбуз. – К.: Техніка, 1987. – 136 с.
14. Ревун, М. П. Новые схемы импульсного отопления нагревательных и термических печей / М. П. Ревун, Е. Н. Барищенко, А. И. Чепрасов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 3. – С. 97-100.
15. Прибытков, И. А. О распределении тепловой нагрузки при импульсно-скоростном нагреве металла / И. А. Прибытков // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1997. – № 7. – С. 66-69.
16. Изотов, Б. В. Математическое моделирование тепловой работы методической печи с импульсным отоплением / Б. В. Изотов, Ю. Н. Шаламов, А. С. Безчерев // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – 2009. – Вип. 19. – С. 222-226.
17. Андреев, С. А. Импульсный режим подключения грунтовых теплообменников в теплонасосных отопительных системах / С. А. Андреев, В. И. Загинайлов, Т. В. Иванова, Е. А. Флегонтов // *Вестник Федерального Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина»*. – 2015. – № 6 (70). – С. 39-44.
18. Таймаров, М. А. Котёл пульсирующего горения природных и пиролизных газов / М. А. Таймаров, М. Р. Шарипов // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2013. – Т. 16. – № 21. – С. 133-135.
19. Синицын, А. А. Исследование особенностей работы котла, основанного на пульсирующем горении газообразного топлива / А. А. Синицын // *Нефтегазовое дело*. – 2006. – № 2. – С. 1-13.
20. Дегтярь, А. Б. Построение алгоритма импульсного отопления зданий и исследование режимов его работы / А. Б. Дегтярь, В. И. Панферов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. – 2008. – Вып. 8. – № 17(117). – С. 41-44.
21. Нагорная, А. Н. Моделирование и управление тепловым режимом здания / А. Н. Нагорная, В. И. Панферов, Е. Ю. Пашнина // *Теоретические основы теплогоснабжения и вентиляции: материалы Межд. науч.-техн. конф.* – М: МГСУ, 2005. – С. 94-98.

22. **Панферов, В. И.** Погрешность определения среднего значения температурного напора отопительного прибора / **В. И. Панферов, А. Б. Дегтярь, Ю. Н. Денисенко** // *Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: материалы 5-й Рос. науч.-техн. конф.* – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – Т.1. – С. 190-194.
23. **Соколов, Е. Я.** Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / **Е. Я. Соколов**. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 472 с.
24. **Кондратьев, Г. М.** Регулярный тепловой режим / **Г. М. Кондратьев**. – М.: Гостехтеоретиздат, 1954. – 408 с.
25. **Черпаков, П. В.** Теория регулярного теплообмена / **П. В. Черпаков**. – М.: Энергия, 1975. – 225 с.

References (transliterated)

1. **Al-Qahtani, H., Yilbas, B. S.** Temperature and stress fields for short pulse heating of solids. *J. Thermophysics and Heat Transfer*, 2011, **25** (1), 173-176, doi: 10.2514/1.49949.
2. **Raushenbakh, B. V.** Vibratsionnoye gorenije [Vibration combustion]. Moscow, State Publishing House of Physical and Mathematical Literature Publ., 1961, 498 p.
3. **Knorre, G. F., Aref'ev, K. M., Blokh, A. G.** Teoriya topochnykh protsessov [The theory of furnace processes]. Moscow-Leningrad, Energija Publ., 1966, 491 p.
4. **Katsnel'son, B. D.** Szhiganiye topliva v pul'siruyushchem potoke [Combustion of fuel in pulsating flow]. *Teoriya i praktika pul'satsionnogo gorenija: Tr. TSKTI – Theory and practice of pulsating combustion: Works of CKTI*, 1965, iss. 64, 3-7.
5. **Wallace, D. C., Sidles, P. H., Danielson, G. C.** Specific heat of high purity iron by a pulse heating method. *J. of Applied Physics*, 1960, **31** (1), 168-176, doi:10.1063/1.1735393.
6. **Hong, Y. N., Ashgriz, J. Andrews.** Experimental Study of Bubble Dynamics on a Micro Heater Induced by Pulse Heating. *J. Heat Transfer*, 2004, **126**, 2, 259-271, doi:10.1115/1.1650388.
7. **Wire, M. S., Fisk, Z., Webb, G. W.** High-temperature specific heat by a pulse-heating method. *Rev. Sci. Instrum.*, 1985, **56**, 6, 1223-1228, doi:10.1063/1.1137980.
8. **Mingcheng, Zong, Zhang, Jianxin, Zhao, Yan.** Pulse-heating infrared thermography nondestructive testing technique. *Proc. SPIE 2899, Automated Optical Inspection for Industry*, 1996, doi: 10.1117/12.253033.
9. **Hu, L., Lv, Yana, Tang, Kai, Richards, Gwynfor.** An Improved Methodology for Pulse Combustion with Programmable Timing Sequence Used in Reheating Furnaces. *ISIJ International*, 2017, **57**, 12, 2266-2268, doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-020.
10. **Druzhinin, G. M., Samoylovich, Yu. A., Popov, Ev. V.** Solution to Problem of Heating of Metal in the Furnace Taking into Account Pulse Nature of Heating. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, **698**, 609-614, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.698.609.
11. **Glinkov, M. A., Kaganov, V. Yu., Enekes, Sh., Gabor, B., Sarka, T.** Issledovaniye teplovogo rezhima nagrevatel'nogo kolodtsa s odnoy verkhney gorelkoy pri impul'snom otopenii [Investigation of the thermal conditions of a heating well with a single top burner under pulsed heating]. *Stal' [Steel]*, 1973, **2**, 171-173.
12. **Kapustin, Ye. A., Shalamov, Yu. N., Kulakov, A. M., Krivenko, P. T., Kiselev, A. I.** Rabota nagrevatel'nykh kolodtsev s verkhney gorelkoy pri pul'siruyushchem fakele [Work of heating wells with an upper burner with a pulsating flame]. *Stal' [Steel]*, 1980, **2**, 1105-1107.
13. **Revun, M. P., Grankovskiy, V. I., Baybuz, A. N.** Intensifikatsiya raboty nagrevatel'nykh pechey [Intensification of the operation of heating furnaces]. Kiev, Equipment Publ, 1987, 136 p.
14. **Revun, M. P., Barishenko, Ye. N., Cheprasov, A. I.** Novyye skhemy impul'snogo otopeniya nagrevatel'nykh i termicheskikh pechey [New schemes of pulse heating of heating and thermal furnaces]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' [Metallurgical and mining industry]*, 2005, **3**, 97-100.
15. **Pribytkov, I. A.** O raspredelenii teplovoy nagruzki pri impul'sno-skorostnom nagreve metalla [On the distribution of thermal load during pulse-speed heating of metal]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya [News of high schools. Ferrous metallurgy]*, 1997, **7**, 66-69.
16. **Izotov, B. V., Shalamov, Yu. N., Bezcherev, A. S.** Matematicheskoye modelirovaniye teplovoy raboty metodicheskoy pechi s impul'snym otopeniyem [Mathematical modeling of thermal work of a methodical furnace with impulse heating]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu [Reporter of the Priazovsky State Technical University]*, 2009, **19**, 222-226.
17. **Andreyev, S. A., Zaginaylov, V. I., Ivanova, T. V., Flegontov, Ye. A.** Impul'snyy rezhim podklyucheniya gruntovykh teploobmennikov v teplonasosnykh otopitel'nykh sistemakh [Pulsed mode of connection of ground heat exchangers in heat pump heating systems]. *Vestnik Federal'nogo Gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina» [Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"]*, 2015, **6** (70), 39-44.
18. **Taymarov, M. A., Sharipov, M. R.** Kotol pul'siruyushchego gorenija prirodnykh i piroliznykh gazov [Boiler of pulsating combustion of natural and pyrolysis gases]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University]*, 2013, **16**, 21, 133-135.
19. **Sinityn, A. A.** Issledovaniye osobennostey raboty kotla, osnovannogo na pul'siruyushchem gorenii gazoobraznogo topliva [Investigation of the peculiarities of the operation of the boiler based on the pulsating combustion of gaseous fuels]. *Neftegazovoye delo [Oil and Gas Business]*, 2006, **2**, 1-13.
20. **Degtyar', A. B., Panferov, V. I.** Postroyeniye algoritma impul'snogo otopeniya zdaniy i issledovaniye rezhimov yego raboty [Construction of an algorithm for pulsed heating of buildings and study of its operating modes]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika» [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics]*, 2008, **8**, 17(117), 41-44.
21. **Nagornaya, A. N., Panferov, V. I., Pashnina, Ye. Yu.** Modelirovaniye i upravleniye teplovym rezhimom zdaniya. *Materialy Mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Teoreticheskiye osnovy teplogazosnabzheniya i ventilyatsii» [Modeling and control of the thermal regime of the building. Proceedings of the Int. Sci.-Tech. Conf. "Theoretical Foundations of Heat and Gas Supply and Ventilation"]*. Moscow, MGSU, 2005, 94-98.

22. **Panferov, V. I., Degtyar', A. B., Denisenko, Yu. N.** Pogreshnost' opredeleniia srednego znacheniiia temperaturного napora otopitel'nogo pribora. *Materialy 5-i Ross. nauch.-tekhn. konf. «Energoberezheniye v gorodskom khozyaystve, energetike, promyshlennosti»* [The error in determining the average value of the temperature head of the heater. Proceedings of the 5th Russ. sci-tech. conf. "Energy saving in the city economy, energy, industry"]. Ul'yanovsk, UIGTU, 2006, 1, 190-194.
23. **Sokolov, Ye. Ya.** Teplofikatsiya i teplovyye seti: uchebnyk dlya vuzov [Heating and heating networks: a textbook for universities]. Moscow, Publishing house of the Moscow Power Engineering Institute Publ., 1999. 472 p.
24. **Kondrat'yev, G. M.** Regul'nyy teplovoy rezhim [Regular thermal conditions]. Moscow, Gostekhteorizdat Publ., 1954, 408 p.
25. **Cherpakov, P. V.** Teoriya regul'yarnogo teploobmena [Theory of regular heat exchange]. Moscow, Energy Publ., 1975, 225 p.

Сведения об авторах (About authors)

Лухтура Федор Иванович – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ст. преподаватель кафедры промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения; г. Мариуполь, Украина; e-mail: lukhelena@yandex.ru.

Fedor Lukhtura – Art. Lecturer, Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, State higher educational establishment "Priazovskiy State Technical University", Mariupol, Ukraine; email: lukhelena@yandex.ru.

Цыганов Владимир Иванович – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ст. преподаватель кафедры промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения; г. Мариуполь, Украина.

Vladimir Tsyganov – Art. Lecturer, Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, State higher educational establishment "Priazovskiy State Technical University", Mariupol, Ukraine.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Лухтура, Ф. И. О применении импульсного подвода тепла в системах теплоснабжения / **Ф. И. Лухтура, В. И. Цыганов** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 32-40. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.05.

Please cite this article as:

Lukhtura, F., Tsyganov, V. On the use of pulse heat in a heat supply system. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 45 (1321), 32–40, doi:10.20998/2413-4295.2018.45.05.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лухтура, Ф. І. Про застосування імпульсного підведення тепла в системах теплопостачання / **Ф. І. Лухтура, В. І. Цыганов** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 32-40. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.05.

АННОТАЦІЯ Розглядаються питання, пов'язані з впливом імпульсного нагріву теплоносія на ефективність роботи і параметри систем теплопостачання. При реалізації такого методу в системах опалення приватних житлових приміщень (будинків) «водогрійний котел - теплообмінники - житлові приміщення», де робочим тілом (теплоносієм) є вода, необхідно, поряд з підтриманням комфортних умов всередині приміщень, створити ефективний режим експлуатації з мінімізацією споживання палива, що можливо може бути взаємовиключними факторами впливу. Крім того, в технічній літературі теоретичне обґрунтування ефективності використання імпульсного нагріву теплоносія в системах опалення житлових будинків вкрай обмежена, що послужило формулюванню мети даної роботи. Для її досягнення розроблена математична модель теплової роботи індивідуальної системи опалення будівлі з імпульсним нагріванням теплоносія. На основі аналізу рівняння динаміки нагріву теплоносія визначені основні параметри імпульсного опалення системи теплопостачання, раціональні значення тривалості підведення тепла і паузи між імпульсами, а також сквапності імпульсів, в залежності від величин поверхні нагріву опалювальних приладів в будинках, теплових втрат в навколишнє середовище, ємності системи. Показано суттєвий вплив зазначених функціональних параметрів на характеристики імпульсного підведення тепла і інтенсивність нагріву теплоносія. З ростом сквапності імпульсів або зі зменшенням коефіцієнта заповнення циклу знижується величина потужності, що підводиться до системи теплопостачання. Визначено діапазони зміни частоти імпульсів, в межах яких може бути більш ефективний імпульсний режим підведення тепла в системах теплопостачання. Введено поняття, за аналогією з регулярним режимом нагріву (охолодження), темпу нагріву (охолодження) теплоносія - швидкості зміни його температури. Отримані результати розробки інженерної методики для розрахунку функціональних параметрів імпульсного підведення тепла до систем теплопостачання дозволяє здійснювати вибір ефективніших параметричних і конструктивних їх характеристик при проектуванні систем теплопостачання і способів експлуатації, в т.ч. теплогенераторів на відповідну теплову потужність.

Ключові слова: джерело тепла; теплоносії; система теплопостачання; імпульс; коефіцієнт заповнення циклу.

Поступила (received) 28.10.2018